

УДК 621.396.96

МЕЖПОЗИЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ СИГНАЛОВ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ БАЗОВО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ

А.А. ДМИТРЕНКО, С.Ю. СЕДЫШЕВ

Военная академия Республики Беларусь
Независимости, 220, Минск, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 1 июня 2016

Синтезирован квазиоптимальный алгоритм обработки стохастических сигналов в базово-корреляционных комплексах пассивной локации. Конкретизирован вид функционального преобразования, связывающего векторы измеренных и наблюдаемых параметров объектов наблюдения, что позволило устранить неоднозначность оценок координат в многоцелевой обстановке. Проведен сопоставительный анализ показателей качества разработанного метода по сравнению с известными способами межпозиционного отождествления сигналов.

Ключевые слова: межпозиционное пространственно-временное отождествление, базово-корреляционная обработка, определение координат.

Введение

Одной из важных проблем, которую необходимо решать в пассивных многопозиционных комплексах, является задача межпозиционного отождествления сигналов [1–5]. Проблема установления соответствия между сигналами, принятыми в различных позициях, особенно актуальна, когда в рабочей зоне находится много объектов наблюдения. Перепутывание данных в процессе их объединения в условиях насыщенной радиоэлектронной обстановки приводит к появлению ложных целей и аномальных ошибок измерения. Наличие нескольких источников радиоизлучения (ИРИ) приводит к возникновению ложных координат реально не существующих объектов наблюдения (рис. 1, а). В разностно-дальномерной системе при наличии двух пар приемных пунктов (ПП) и двух целей измерительная информация представляет собой совокупность 4 значений относительных временных задержек (рис. 1, б), 2 из которых (по числу измерительных баз), относятся к одному ИРИ, остальные 2 – ко второму ИРИ. Линии положения дают четыре точки пересечения (рис. 1, а), причем истинным координатам соответствуют лишь две из них. Возможные гипотезы отождествления относительных временных задержек представлены на рис. 1, б.

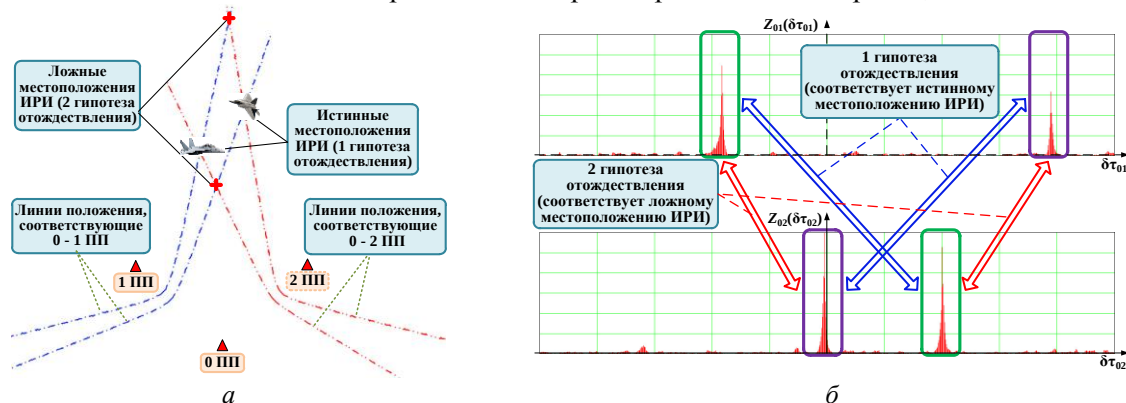


Рис. 1. Ложные пересечения линий положения (а); гипотезы отождествления (б)

Известны следующие основные алгоритмы межпозиционного отождествления [6]:

- прямой перебор всех возможных гипотез отождествления;
- сличение полученных путем использования дополнительных источников информации сигнальных параметров (частота, ширина спектра, длительность импульса и др.) с эталонными значениями из баз данных;
- селекция на этапе вторичной обработки, когда результаты текущих измерений отождествляются с имеющимися траекториями целей.

Недостатком всех вышеуказанных способов является то, что все они требуют задействования значительных материальных, вычислительных и временных ресурсов.

Основой межпозиционного отождествления может являться стробирование пространства обзора по координатам с использованием априорных зависимостей между элементами разрешения в сферической системе координат (дальность, азимут, угол места) и диапазонами значений относительных временных задержек сигналов между разнесенными в пространстве приемными пунктами. Гипотезы, объединяющие отметки, не попавшие в стробы, отбрасываются, как ложные.

С целью повышения эффективности функционирования многопозиционных базово-корреляционных комплексов пассивной локации (КПЛ) в многоцелевой обстановке было синтезировано устройство обработки стохастических сигналов, реализующее новый способ пространственно-временного межпозиционного отождествления сигналов, отличающееся согласованным обзором пространства по дальности, азимуту, углу места и разности времен запаздывания; осуществлен сопоставительный анализ показателей эффективности синтезированного устройства по сравнению с известными алгоритмами отождествления методом имитационного математического моделирования.

Результаты статистического синтеза алгоритмов обработки стохастических сигналов

Опираясь на результаты трудов [1–5], был проведен статистический синтез алгоритмов работы базово-корреляционного комплекса пассивной локации для стохастической модели сигналов, помех и шумов с неизвестными параметрами с использованием теории статистических решений. В соответствии с полученным алгоритмом (1) осуществляется корреляционная обработка принятых реализаций $f_{i,k}$ (2), сравнение полученных частных отношений правдоподобия $Z(f_{i,k})$ с соответствующими порогами $Z_{*i,k}$ и принятием окончательного решения об обнаружении согласно принятому критерию « k из n »:

$$\text{если } Z(f_{i,k}) \geq Z_{*i,k} \cap \delta\tau_{i,k} \in \Delta_{i,k}(\delta\tau_{i,k}) \forall i, k = \overline{1, M}, \text{ то } A^* = 1, \text{ иначе } A^* = 0, \quad (1)$$

$$Z(f_{i,k}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(t - \tau_i) e^{j(\omega t + \phi_i)} f_k(t - \tau_k) e^{j(\omega t + \phi_k)} dt. \quad (2)$$

Частные адаптивные пороги обнаружения формируются согласно критерию Неймана-Пирсона по методу скользящего среднего: $Z_* = -\bar{Z}_0 \ln(F_{\text{пр}}) = -\frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} Z_k \ln(F_{\text{пр}})$, где L – число ячеек оценки скользящего окна; Z_k – уровень фона в k -м элементе разрешения.

Разовые оценки значений разности времен запаздывания получают в соответствии с критерием максимума отношения правдоподобия при простой функции стоимости:

$$\frac{\partial Z(\delta\tau)}{\partial \delta\tau} = \begin{cases} \frac{\partial Z(\delta\tau)}{\partial \delta\tau_{01}} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial Z(\delta\tau)}{\partial \delta\tau_{ik}} = 0. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \delta\hat{\tau}_{01} = \arg \max[Z_{01}(\delta\tau_{01})]; \\ \dots \\ \delta\hat{\tau}_{ik} = \arg \max[Z_{ik}(\delta\tau_{ik})], \end{cases}$$

после чего определяются пространственные координаты объекта наблюдения путем вычисления корней системы нелинейных уравнений (3), для решения которой были исследованы основные численные алгоритмы [7]. Наилучшие результаты при обработке реальной координатной информации были достигнуты при использовании алгоритма Левенберга-Марквардта [8].

$$\delta r_{ik} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - \sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2 + (z_k - z)^2}, \quad (3)$$

где i, k – номера ПП; δr_{ik} – измеренные значения разности хода; x_i, y_i, z_i – координат ПП; x, y, z – искомые координаты ИРИ.

Задача межпозиционного отождествления в синтезированном устройстве (рис. 2) решается путем введения дополнительного критерия соответствия текущего значения разности времен запаздывания $\delta\tau$ диапазону относительных временных задержек $\Delta(\delta\tau)$, соответствующему текущему пространственному элементу разрешения $\Delta P_{\beta, \epsilon, r}$.

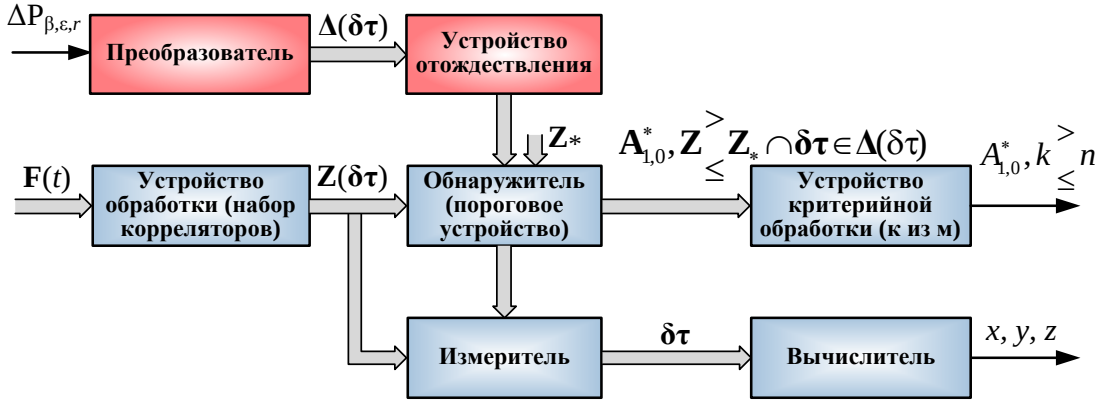


Рис. 2. Алгоритм обнаружения, отождествления, измерения

Селекция обрабатываемых сигналов осуществляется за счет преобразования соответствующего объема в пространстве сферических координат (рис. 3, а) в область в пространстве относительных временных задержек (рис. 3, б), конфигурация которой определяется нелинейным функциональным координатным преобразованием:

$$\Delta P_{\Delta_{01}(\delta\tau_{01}), \Delta_{02}(\delta\tau_{02}), \Delta_{03}(\delta\tau_{03})} = \Phi(\Delta P_{\Delta\beta, \Delta\epsilon, \Delta r}) \quad (4)$$

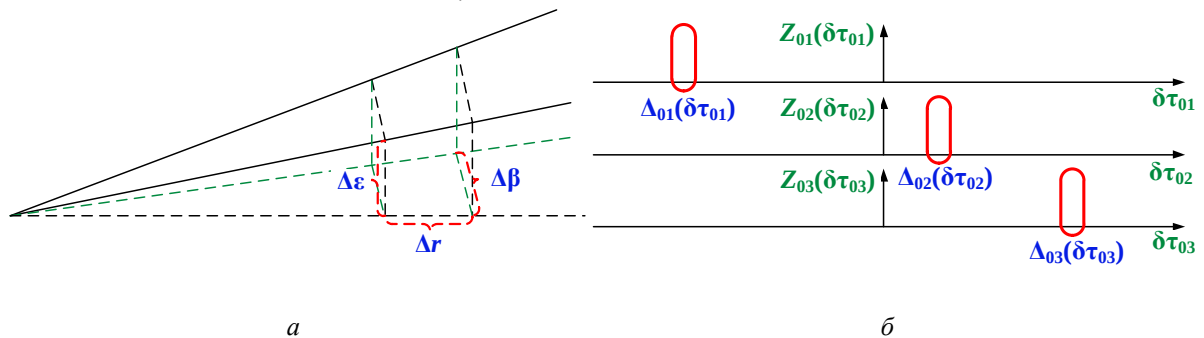


Рис. 3. Элементы разрешения в сферической системе координат (а) и в пространстве относительных временных задержек (б)

Взаимосвязь пространственного положения источника радиоизлучения и разности времен запаздывания его сигналов относительно приемных пунктов системы

Конкретизировать вид функционального преобразования (4) пространственных элементов разрешения из сферической системы координат в совокупность диапазонов относительных временных задержек представляется возможным на основе анализа взаимосвязи пространственного положения объекта наблюдения и разности времен запаздывания его сигналов [9–12]:

$$\delta\tau(r_i, \beta_i, \epsilon_i) = \frac{1}{c} [r_i - \sqrt{r_i^2 - 2r_i \cdot d(\sin(\epsilon_i) \sin(\epsilon_d) + \cos(\epsilon_i) \cos(\epsilon_d) \cos(\beta_i - \beta_d)) + d^2}],$$

где $\delta\tau(r_i, \beta_i, \epsilon_i)$ – разность времен запаздывания комплексных огибающих сигналов ИРИ между приемными пунктами, β_i – азимут ИРИ, β_d – азимут ПП, ϵ_i – угол места ИРИ; ϵ_d – угол места приемного пункта; d – расстояние до ПП, r_i – дальность до ИРИ, c – скорость света.

На рис. 4 показаны пространственное расположение приемных пунктов комплекса пассивной локации и соответствующие трем парам приемных позиций зависимости разностей

времен запаздывания сигналов источников радиоизлучения от его текущего азимута и дальности относительно центрального ПП при отсутствии учета значений угла места.

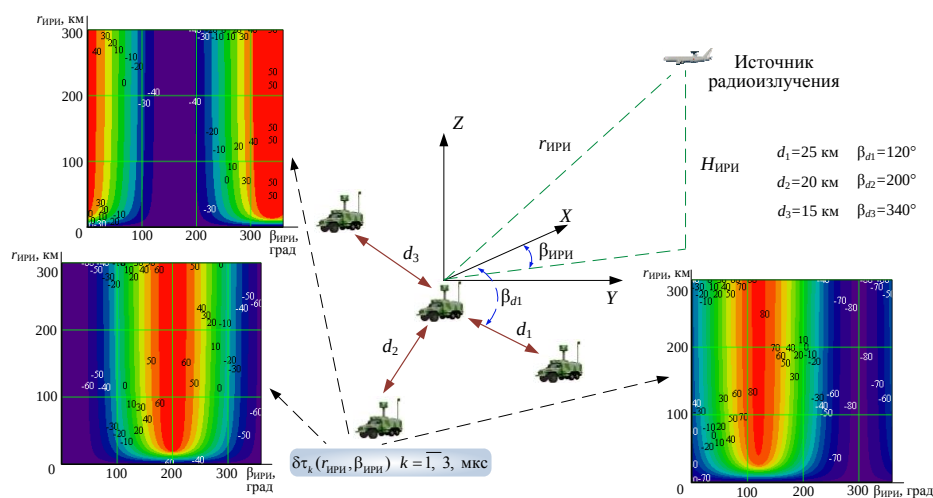


Рис. 4. Зависимость разности времен запаздывания сигналов ИРИ между ЦПП и k -м ПП от дальности и азимута

Разбив пространство обзора на элементы разрешения по дальности, азимуту и углу места, можно априорно вычислить диапазоны значений относительных временных задержек сигналов ИРИ, в которых, в последующем, и осуществлять обзор. Использование данной зависимости позволяет устранить неоднозначность полученных оценок пространственных координат при наличии в рабочей зоне нескольких ИРИ, что наглядно проиллюстрировано на рис. 5, а. Истинному местоположению ИРИ соответствуют только I и IV сектора обзора по азимуту. Обзор же по разности хода, соответствующей остальным угловым секторам (включая II и III, в которых находятся ложные пересечения линий положения) не производится.

Для обратного перехода от рассмотрения задачи работы комплекса пассивной локации на плоскости к работе в пространстве необходимо сформировать для каждой из пар приемных пунктов совокупность диапазонов значений угла места (рис. 5, б), в каждом из которых решать задачу обработки информации с последующей интеграцией полученных результатов.

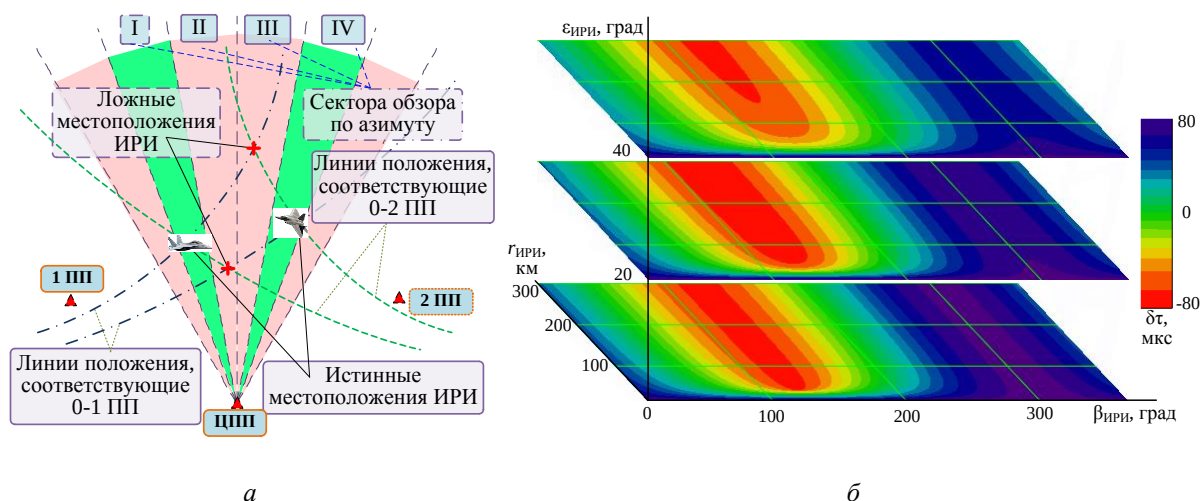


Рис. 5. Устранение неоднозначности измерений координат ИРИ за счет стробирования пространства наблюдения по азимуту (а); зависимость разности времен запаздывания от азимута, угла места и дальности для одной пары приемных позиций (б)

Обобщенная структурная схема базово-корреляционного комплекса пассивной локации с согласованным по азимуту обзором по разности хода

Синтезированные алгоритмы обнаружения-отождествления-измерения могут быть реализованы в виде обобщенной структурной схемы, представленной на рис. 6. Особенности

данной схемы являются применение спектрального коррелятора и использование угловой координатной информации путем реализации виртуального сканирования.

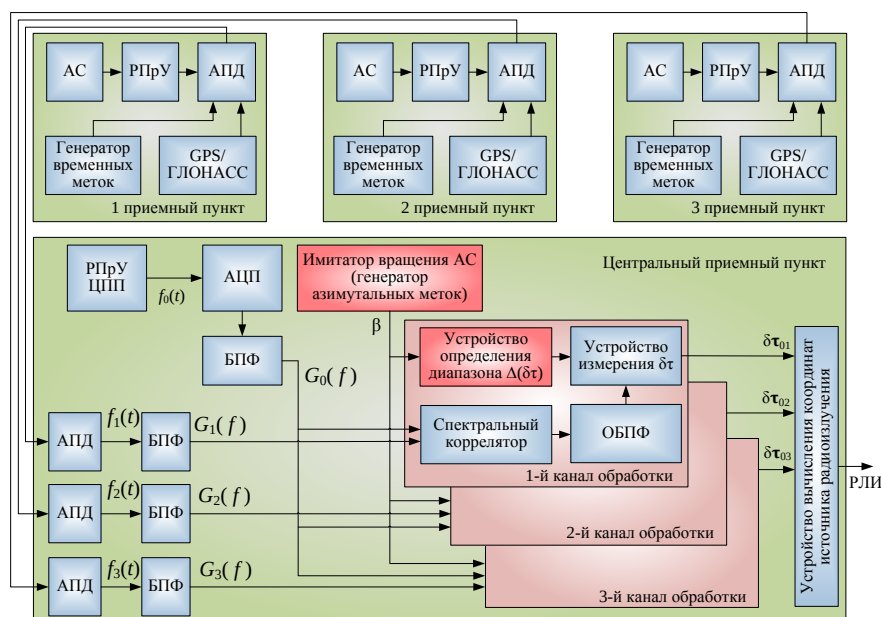


Рис. 6. Обобщенная структурная схема базово-корреляционного разностно-дальномерного КПЛ

Корреляционная обработка сигналов в частотной области дает возможность использования алгоритмов быстрого преобразования Фурье, что позволяет значительно снизить аппаратные и временные затраты при вычислении взаимнокорреляционных функций по сравнению с устройством обработки во временной области.

Применение направленной антенны влечет увеличение стоимости и сложности системы. Стоимость направленной антенны с возможностью пространственного сканирования в современных комплексах достигает 60–70 % от цены всего изделия. Также, вследствие последовательного обзора по азимуту, вероятность обнаружения сигналов ИРИ, работающих на излучение непродолжительное время, уменьшается. Применение направленной антенной системы вступает в противоречие с требованием широкополосности приемного тракта для обеспечения возможности работы по максимальному количеству типов бортовых радиоэлектронных средств. Данные недостатки обуславливают преимущество использования ненаправленных антенн с реализацией виртуального сканирования пространства обзора по азимуту путем применения генератора азимутального кода.

Оценка эффективности разработанного способа межпозиционного отождествления

Для сравнения различных способов межпозиционного отождествления, в основе которых лежат различные физические принципы, математические аппараты работы и практические средства реализации, были использованы такие показатели качества, как потребные вычислительные затраты на решение задачи межпозиционного отождествления и стоимость практической реализации в условиях идентичности остальных требований и условий работы.

Выигрыш в потребном числе операций вычисления пространственных координат источников радиоизлучения при реализации разработанного способа межпозиционного отождествления в сравнении с методом прямого перебора гипотез отождествления составляет:

$$B = \frac{K_1}{K_2} = \frac{(N!)^{M-1}}{N}, \text{ где } K_1 - \text{потребное количество вычислительных операций при прямом}$$

переборе гипотез отождествления [1]; K_2 – потребное количество вычислительных операций при разработанном способе отождествления; N – число объектов наблюдения; M – число приемных пунктов. Для сравнения в таблице приведено потребное число операций вычисления координат при применении метода прямого перебора и при организации обзора с учетом разработанного способа межпозиционного отождествления сигналов ИРИ.

Выигрыш в числе потребных вычислительных операций

M	N	K_1	K_2	B
4	4	576	4	144
	5	14400	5	2880
	6	518400	6	86400

Приблизительную стоимость реализации опытного образца многопозиционного базово-корреляционного комплекса пассивной локации можно оценить величиной порядка 500 тыс. долл. США [13, 14], что, как минимум, в несколько раз меньше стоимости зарубежных систем аналогичного назначения [15] (цена чешской системы VERA-E составляет 5 млн. долл. США, украинской системы «Кольчуга» – около 24 млн. долл. США).

Причиной выигрыша в стоимости является отсутствие необходимости применения:

- многокритерийных средств распознавания принятых сигналов;
- эталонных баз данных (в сравнении с которыми решается задача селекции в станциях радиотехнической разведки);
- средств измерения параметров обрабатываемых сигналов (широкополосные анализаторы спектра, устройства измерения несущей частоты и полосы обнаруживаемых сигналов, средства измерения длительности и периода повторения импульсных сигналов, устройства определения вида и параметров закона модуляции, и др.);
- этапа вторичной обработки первичной радиолокационной информации;
- направленных широкополосных антенных систем с возможностью пространственного сканирования.

Результаты математического имитационного моделирования

Результаты имитационного моделирования работы базово-корреляционного КПЛ с виртуальным обзором по азимуту и спектральной корреляционной обработкой при наличии пяти ИРИ (расположенных на азимутах 75°, 125°, 205°, 270°, 355°) представлены на рис. 7.

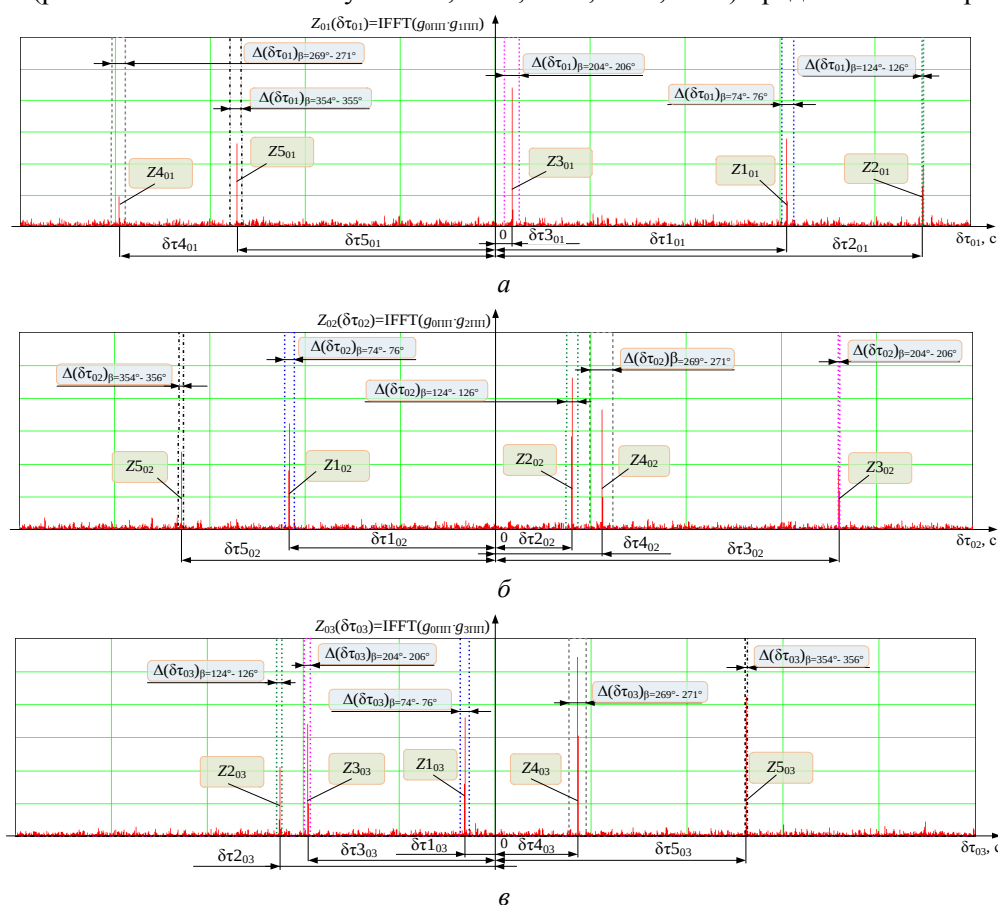


Рис. 7. Частные отношения правдоподобия (модуль результата обратного преобразования Фурье произведений спектров сигналов центрального ПП и 1(а), 2(б) и 3(в) приемных пунктов КПЛ)

Поиск, обнаружение и измерение разности времен запаздывания (аргументы максимумов $Z_{N i,k}$ частных отношений правдоподобия $Z_{i,k}(\delta\tau_{i,k})$) производятся только в заданных интервалах значений $\Delta(\delta_{i,k})_{\beta}$, соответствующих текущему угловому сектору β_N (N – номер ИРИ). Полученный выигрыш в потребном количестве операций вычисления пространственных координат составил 2880 по сравнению с методом прямого перебора гипотез отождествления, что является подтверждением полученных ранее показателей вычислительной эффективности разработанного способа межпозиционного отождествления.

IDENTIFICATION OF SIGNALS IN MULTI-STATIC CROSS-CORRELATION PASSIVE RADARS

A.A. DMITRENKO, S.Y. SEDUSHEV

Abstract

The algorithm of stochastic signals processing in cross-correlation passive radars is synthesized. The functional transformation between vectors of measured and observable parameters of supervision objects is concretized. It has allowed to eliminate ambiguity of coordinates estimations in multi-purpose conditions. Results of the analysis indicators of quality of the developed method in comparison with known ways of an interitem signals identification is carried out.

Keywords: interpositional space-time identification, base-correlation processing, coordinates determining.

Список литературы

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М., 1993.
2. Охрименко А.Е. Основы обработки и передачи информации. Минск, 1990.
3. Савенко С.А. Теория и техника совместной адаптивной обработки сигналов в обзорных активно-пассивных радиолокационных системах: дис. док. техн. наук. Минск, 2000.
4. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М., 2004.
5. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория / Под ред. Я.Д. Ширмана. М., 2007.
6. Просов А.В., Квиткин В.П. Алгоритмы межпозиционного отождествления результатов радиолокационных измерений. Харьков, 2008.
7. Мышенков В.И., Мышенков Е.В. Численные методы. М., 2001.
8. Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization. New York, 1999.
9. Дмитренко А.А., Седышев С.Ю. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С., фонд. науки. 2014. № 4. С. 85–88.
10. Дмитренко А.А., Седышев С.Ю., Горшков С.А. Устройство быстрого обзора по разности времен запаздывания в корреляционно-базовых комплексах пассивной локации / Патент РБ № 9543.
11. Дмитренко А.А., Седышев С.Ю., Горшков С.А. Устройство определения угловой координаты источника радиоизлучения в корреляционно-базовых комплексах пассивной локации / Патент РБ № 9864.
12. Дмитренко А.А., Седышев С.Ю., Горшков С.А. Способ уменьшения интервала обзора по разности времен запаздывания в корреляционно-базовых комплексах пассивной локации / Патент РБ № 20162.
13. Акиншин Р.Н. // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 10. С. 124–129.
14. Роздобудько В.В., Пивоваров И.И., Помазанов А.В. и др. // Вопросы специальной радиоэлектроники. Сер. ОВР. 2004. С. 57–67.
15. Станция радиотехнической разведки «Кольчуга» | Экономические известия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eizvestia.com/armiya/full/567-stanciya-radiotekhnicheskoy-razvedki-kolchuga>. – Дата доступа: 31.05.2016.